**Лекция 6.**

**КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Конструкторы при выборе материала для какой-либо конструкции или изделия не могут учитывать только один или два какие-либо критерия, характеризующие свойства материала. Как минимум, таких критериев должно быть четыре: жесткость конструкции, прочность материала, долговечность и надежность материала в условиях работы данной конструкции.

Жесткость конструкции. Для многих силовых эле­ментов конструкций — шпангоутов, стрингеров, плоских пластинок, цилиндрических оболочек и т. п. — условием, определяющим их работоспособность, является местная или общая жесткость (устойчивость), определяемая их конструктивной формой, схемой напряженного состоя­ния и т. д., а также и свойствами материала. Как было отмечено в гл. 3, показателем жесткости материала яв­ляется модуль нормальной упругости Е (модуль жест­кости)— структурно нечувствительная характеристика, зависящая только от природы материала.

Среди главных конструкционных материалов наибо­лее высокое значение модуля Е имеет сталь, наиболее низкое — магниевые сплавы и стеклопластики. Однако оценка этих материалов существенно изменяется при учете их плотности (удельного веса) и использовании критериев удельной жесткости и устойчивости: Е/у,

V E/y, V E/ γ (табл. 6).

При оценке по этим критериям, выбираемым в соот­ветствии с формой и напряженным состоянием, во мно­гих случаях наиболее выгодным материалом являются магниевые сплавы и стеклопластики, наименее выгод­ным материалом — углеродистые и легированные стали. Прочность конструкционных материалов, используе­мых в технике, изменяется в очень широком диапазо­не—от 10—15 до 250—350 кгс/мм2. Однако выбор мате­риала только по абсолютному значению показателей прочности σт  (σ0,2). сгв и др. не дает правильной оценки возможностей материала. Для создания конструкции (машины) с минимальной массой большое значение ; имеет плотность (удельный вес) материалов у. С учетом ' этого более правильно оценивать значение его удельной

 Таблица 6

Удельная жесткость (устойчивость) конструкционных материалов

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Материал | Е, кгс/мм2 | γ, г/см3 | E/v | E/y | E/V |
| Углеродистые и легированные стали | 18 000-22000 | 7,8 | 2380-2785 | 17-18,7 | 3,3-3,5 |
| Титановые сплавы | 1000-12000 | 4,5 | 2220-2675 | 22-24 | 4,8-5,1 |
| Алюминиевые сплавы | 6700-7200 | 2,8 | 2395-2575 | 29,3-30,4 | 6,8-6,9 |
| Магниевые сплавы | 4100-4400 | 1,8 | 2280-2445 | 35,65-36,8 | 8,9-9,1 |
| Стеклопластики  | 2000-2200 | 1,8 | 1110-1220 | 25-26,1 | 7-7,2 |

прочности отношением характеристик прочности σв , σт и т. д. к плотности (удельному весу) материала, напри­мер σв 1у, σт ly, где у — плотность (удельный вес) мате­риала, г/см3.

Из данных, приведенных в табл. 7, видно, что, на­пример, алюминиевые сплавы, имея значительно мень­шую абсолютную прочность, чем углеродистые и мно­гие легированные стали, превосходят их по удель­ной прочности. Это означает, что при равной проч­ности масса изделия из

Таблица 7

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Материал  | σв | Y, г/см1 | σв /у-105 см |
| Углеродистая конструкционная сталь | 45-100 | 7,8 | 6-15 |
| Легированная конструкционная сталь 30 ХГСА | 110-140 | 7,8 | 15-19 |
| Высокопрочные стали | 180-200 | 7,8 | 22-25 |
| Магниевые сплавы МА 2, МА 8 | 22-28 | 1,8 | 12-15 |
| Алюминиевые сплавы Д 16, В 95 | 42-60 | 2,8 | 16-21 |
| Титановые сплавы | 120-140 | 4,5 | 26-40 |
| Стеклопластики типа СВАМ | 70 | 1,8 | 38-50 |

алюминиевых сплавов меньше, чем изделия из стали. Наиболее высокую удельную прочность имеют стеклопластики типа СВАМ, а из металлических конструкционных материалов — титано­вые сплавы.

Оценивая реальную прочность конструкционного ма­териала, следует учитывать характеристики пластично­сти б, г|), а также вязкость материала, так как именно эти показатели в основном определяют возможность хрупкого разрушения.

Надежность конструкции — это ее способность крат­ковременно работать вне расчетной ситуации, например выдерживать ударные нагрузки. Главным показателем надежности является запас вязкости материала . Долговечность конструкции также зависит от усло­вий ее работы. Прежде всего это сопротивление износу при трении и контактная прочность (сопротивление ма­териала поверхностному износу, возникающему при тре­нии качения со скольжением). Долговечность изделия, кроме того, зависит от предела выносливости, зависяще­го в свою очередь от состояния поверхности (см. гл. 3, с. 188). Определяется долговечность и коррозионной стойкостью материала.

Сплавы железа — сталь и чугун являются основными металлическими материалами, используемыми в раз­личных отраслях народного хозяйства.

Рис. 107. Зависимость свойств горячекатаной углеродистой стали от содержания углерода

Наиболее универсальным и широко используемым ма­териалом является сталь. Кроме перечисленных требо­ваний, стали должны иметь и хорошие технологические свойства: легко обрабатываться давлением (многие из­делия получают прокаткой, ковкой или штамповкой), а также хорошо обрабатываться на металлорежущих станках, хорошо свариваться. В ряде случаев от сталей требуется высокая коррозионная стойкость или жаропрочность и т. д. Достоинством сталей является возможность получать в них нужный комплекс свойств, изменяя их состав и обработку.

**8.1. Классификация и маркировка сталей**

Все стали можно разделить на две группы —углеродистые и легированные. Углеродистые стали являются основным конструкционным материалом, который используют в различных областях промышлен­ности. Эти стали про­ще в производстве и значительно дешевле легированных. Но уг­леродистые стали — это не только сплав железа с углеродом, это сплав сложного хи­мического состава. По­этому свойства таких сталей определяются и количеством углеро­да, и содержанием присутствующих в них примесей, которые взаимодействуют и с железом, и с углеродом.

Влияние углерода. В углеродистой стали механиче­ские свойства зависят главным образом от содержания углерода. С увеличением содержания углерода в стали увеличивается количество цементита и соответственно уменьшается количество феррита, т. е. увеличиваются прочность и твердость и уменьшается пластичность (рис. 107). Как видно из графика, приведенного на рис. 107, прочность повышается только до 1% С, а при более высоком содержании углерода она начинает уменьшаться. Происходит это потому, что образующая­ся по границам зерен в заэвтектоидных сталях сетка вторичного цементита уменьшает прочность стали.

Кроме углерода, в стали обязательно присутствуют еще другие элементы, наличие которых обусловлено различными причинами. Различают примеси: постоян­ные, скрытые, случайные и специально введенные.

Постоянные примеси. Это кремний, марганец, фос­фор и сера. Марганец и кремний вводят в процессе вы­плавки в сталь для ее раскисления, т. е. для удаления закиси железа, поэтому их также называют технологи­ческими примесями.

Кроме того, марганец способствует уменьшению со­держания сульфида железа FeS в стали: FeS+Mn-v ->MnS+Fe. Марганец и кремний растворяются в фер­рите, повышая его прочность; марганец может также растворяться и в цементите. Углеродистые стали обычно содержат до 0,7—0,8% Мп и до 0,5% Si.

Сера — вредная примесь — попадает в сталь глав­ным образом с исходным сырьем — чугуном. Сера не­растворима в железе, она образует с ним соединение FeS —сульфид железа. При взаимодействии с железом образуется эвтектика (Fe+FeS) с температурой плав­ления 988° С. Поэтому при нагреве стальных заготовок для пластической деформации выше 900° С сталь стано­вится хрупкой. При горячей пластической деформации заготовки разрушаются. Это явление называется крас­ноломкостью. Одним из способов уменьшения влия­ния серы является введение марганца. Соединение MnS плавится при 1620° С, эти включения пластичны и не вызывают красноломкости.

Содержание серы в сталях допускается не более 0,06%.

Фосфор попадает в сталь главным образом также с исходным чугуном, использованным для выплавки ста­ли. До 1,2% фосфора растворяется в феррите, уменьшая его пластичность. Фосфор обладает большой склон­ностью к ликвации, поэтому даже при незначительном среднем количестве фосфора в отливке всегда могут об­разовываться участки, богатые фосфором. Располага­ясь вблизи границ зерен, фосфор повышает температуру перехода в хрупкое состояние, т. е. вызывает хладно­ломкость. Поэтому фосфор, как и сера, является вредной примесью, содержание его в углеродистой ста­ли допускается до 0,050%. Чем больше углерода в стали, тем сильнее влияние фосфора на ее хрупкость.

Содержание серы и фосфора в стали зависит от спо­соба ее выплавки. Скрытые примеси. Так называют присутствующие в стали газы — азот, кислород, водород — ввиду сложно­сти определения их количества. Газы попадают в сталь при ее выплавке. В твердой стали они могут присутст­вовать, либо растворяясь в феррите, либо образуя хими­ческие соединения (нитриды, оксиды). Газы могут на­ходиться и в свободном состоянии в различных несплошностях. Даже в очень малых количествах азот, кислород и водород сильно ухудшают пластические свойства стали. Содержание их допускается 10~2—10~4%. В результате вакуумирования стали их содержание уменьшается, свойства улучшаются (см. разд. I, гл. 3).

Случайной примесью может быть любой элемент (медь, алюминий, вольфрам, никель), который попал в , шихту вместе с металлоломом или чугуном при выплав­ке стали. Содержание этих элементов ниже тех преде­лов, когда их вводят специально как легирующие до­бавки.

Специальные примеси. Это элементы, специально вводимые в сталь для получения каких-либо заданных свойств. Такие элементы называют легирующими, а ста­ли, их содержащие, — легированными сталями.

Содержание легирующих элементов в сталях может изменяться в очень широких пределах. Сталь считают легированной хромом или никелем, если содержание этих элементов составляет 1 % или более. При содержа­нии ванадия, молибдена, титана, ниобия и других эле­ментов более 0,1—0,5% стали считают легированными этими элементами. Сталь является легированной и в том случае, если в ней содержатся только элементы, харак­терные для углеродистой стали, марганец или кремний, но их количество должно превышать 1%.

В конструкционных сталях легирование осуществля­ют с целью улучшения механических свойств — прочно­сти, пластичности и т. д. Кроме того, легирующие эле­менты изменяют физические, химические и другие свой­ства стали.

Нужный комплекс свойств достигается не только ле­гированием, но и рациональной термической обработ­кой, в результате которой получается необходимая структура.

Как правило, легирующие элементы существенно увеличивают стоимость стали, а некоторые из них к тому же являются дефицитными металлами, поэтому добавление их в сталь должно быть строго обосно­вано.

Существует несколько классификаций, позволяющих систематизировать стали, что упрощает поиск нужной марки стали с учетом ее свойств.

Стали классифицируют по химическому составу, спо­собу выплавки, по структуре в отожженном или нор­мализованном состоянии, по качеству и по назначе­нию.

*Классификация по химическому составу*

По химическому составу прежде всего все стали мож­но- разделить на две большие группы: углеродистые и легированные. В свою очередь легированные стали в зависимости от числа легирующих элементов различают как трехкомпонентные (содержат кроме железа и угле­рода один какой-либо легирующий элемент), четырех-компонентные и т. д. Более применительной является классификация с указанием легирующих элементов: стали хромистые, хромоникелевые, хромоникельмолиб-деновые и т. д.

По степени легирования, т. е. по содержанию ле­гирующих элементов, стали условно подразделяют на низколегированные (содержат в общем 2,5—5% леги­рующих элементов), среднелегированные (до 10%) и высоколегированные (более 10%).

*. Классификация по способу выплавки*

Углеродистые стали выплавляют главным образом мартеновским и кислородно-конверторным способами. Наиболее качественную углеродистую сталь выплавляют в электрических дуговых печах.

В зависимости от степени раскисления при выплавке стали могут быть спокойными (сп), полуспокойными (пс) или кипящими (кп), что и указывают в марке. Спокойные, полуспокойные и кипящие стали при одина­ковом содержании углерода имеют практически одина­ковую прочность. Главное их различие заключается в пластичности, которая обусловлена содержанием крем­ния. Содержание кремния в спокойной стали 0,15— 0,35%, в полуспокойной 0,05—0,15%, в кипящей <0,05%.

Легированные стали выплавляют только спокойными в печах мартеновских или электрических1. В результате уменьшения содержания кремния в феррите кипящих сталей они становятся мягкими, поэтому кипящая сталь хорошо штампуется в холодном состоянии (например, для изготовления деталей глубокой вытяжкой). Но из-за большого содержания газов, особенно азота, кипящие стали склонны к деформационному старению. Кроме того, большое содержание кислорода в этой стали повышает порог хладноломкости, кипящие стали становятся хрупкими уже при —10° С, в то время как спокойные стали, содержащие одинаковое количество углерода, могут работать до —40° С. Они более склонны к зональной ликвации. Это наиболее дешевые стали, но качество металла низкое, поэтому их используют для изготовления неответственных деталей и конструкций.

*Классификация по структуре*

По структуре в отожженном состоянии стали разделяют на доэвтектоидные, эвтектоидную и заэвтектоидные . Легированные стали, кроме того, могут быть ферритного, аустенитного и ледебуритного классов. К ферритному классу относятся стали, в которых при малом содержании углерода имеется большое количест­во ферритообразующих легирующих элементов, напри­мер хрома. К ледебуритному классу относятся стали с большим содержанием углерода и карбидообразующих элементов, в результате чего в их структуре имеются первичные карбиды — легированный ледебурит.

По структуре после охлаждения на воздухе легиро­ванные стали разделяют на три основных класса: пер­литный, мартенситный и аустенитный (рис. 108) (струк­туру во всех случаях определяют по образцам неболь­шого сечения, диаметром до 25 мм). Ранее было отмечено, что легирующие элементы увеличивают ус­тойчивость аустенита в перлитной области и понижают температуру мартенситного превращения. Поэтому при одинаковой скорости охлаждения до комнатных темпе­ратур при различном содержании легирующих элемен­тов и углерода получаются различные структуры.

Рис. 108. Диаграммы изотермического распада аустенита трех классов стали

*Классификация по качеству*

В основе классификации сталей по качеству лежит содержание вредных примесей — серы и фосфора. Раз­личают углеродистую сталь обыкновенного качества, сталь качественную конструкционную и сталь высоко­качественную. Сталь обыкновенного качества (ГОСТ 380—71, см. приложение, табл. 4) содержит повышенное количество серы (до 0,05%) и фосфора (до 0,04%, СтО до 0,07% Р). Эти стали выплавляют преимущественно в больших мартеновских печах скрап-рудным процессом или в кис­лородных конверторах. Обозначение марок стали — бук­венно-цифровое: буквы Ст означают «сталь», цифры от 0 до 6 — условный номер марки, например Ст0, Ст2... Ст 6. Степень раскисленности стали обозначают бук­вами кп, пс и сп. Кипящими выплавляют стали ма­рок Ст 0 — Ст 4, полуспокойными и спокойными могут выплавляться все марки сталей от Ст 1 до Ст 6.

Сталь подразделяют на три группы: А, Б и В. В мар­ках указывают только группы Б и В, например Ст2кп (сталь 2, группы А, кипящая); Б СтЗкп (сталь 3, груп­пы Б, кипящая); В Ст Зпс (сталь 3, группы В, полуспо­койная); В Ст 4сп (сталь 4, группы В, спокойная) и т. п.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Сталь  | Ст1 пс | Ст3 пс | Ст 6 сп |
| σB, кгс/мм2 | 32—42 | 38—49 | >60 |
| σт, кгс/мм2 | - | 21—25 | 30—32 |
| δ % | 31—34 | 23—26 | 12—15 |

Химический состав стали группы А не регламентиру­ется, его только указывают в сертификатах металлурги­ческого завода-изготовителя. Стали этой группы обычно заказчики используют в состоянии поставки, поэтому их поставляют по механическим свойствам (σв σт и δ ). С увеличением номера стали прочность увеличивается, а пластичность уменьшается:

Стали группы Б поставляют по химическому составу,так как эти стали в дальнейшем обычно подвергают раз­личной обработке (ковке, сварке, термической обработке) с целью получения нужного заказчику комплекса механических свойств.

Стали группы В поставляют по химическому составу и механическим свойствам — по нормам для сталей групп А и Б.

Углеродистая сталь обыкновенного качества — дешевая и во многих случаях удовлетворяет требованиям по механическим свойствам, предъявляемым к металлу. \_ Ее выплавка составляет около 80% всего производства углеродистых сталей.

Качественные стали. В качественных сталях максимальное содержание вредных примесей составляет не более 0,04% серы и 0,04% фосфора. Качественная сталь менее загрязнена неметаллическими включениями и имеет меньшее содержание растворенных газов. Поэто-
му при примерно одинаковом содержании углерода качественные стали имеют более высокую пластичность и вязкость по сравнению со сталями обыкновенного качества особенно при низких температурах. Качественные углеродистые стали поставляют по химическому составу и по механическим свойствам. Марки сталей обозначают цифрами, указывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента (пределы по углероду 0,07—0,08% для одной марки), степень раскисленности — буквами *пс, кп* (спокойные качественные стали маркируют без индекса). Например, сталь 10кп (0,10% С, кипящая), сталь 30пс (0,30% С, полуспокойная), сталь
45 (0,45% С, спокойная) и т. д. Качественные углеродистые стали поставляются заказчику в различном состоянии: без термической обработки, после нормализации, различной степени пластической деформации и т. д.
Состав некоторых качественных углеродистых сталей и их механические свойства приведены в приложении, табл. 5.

В высококачественных сталях стремятся получить минимально возможное содержание серы и фосфора (S ≤0.035% и Р≤0,035%). Поскольку при этом стои­мость стали существенно увеличивается, конструкцион­ные углеродистые стали редко выплавляют высококаче­ственными. Для обозначения высокого качества стали в конце обозначения марки стали ставят букву А, напри­мер сталь У10А. Легированные стали выплавляют толь­ко качественными, а чаще —высококачественными. Для обозначения марок легированных сталей в СССР при­нята буквенно-цифровая система.

Легирующие элементы обозначают следующими бук­вами: хром — X, никель — Н, молибден — М, вольфрам — В, кобальт — К, титан — Т, азот — А \*, марганец — Г, медь — Д, ванадий — Ф, кремний — С, фосфор — П, алюминий — Ю, бор — Р, ниобий — Б, цирконий — Ц.

Марка стали обозначается сочетанием букв и цифр. Для конструкционных марок стали первые две цифры показывают среднее содержание углерода в сотых до­лях процента. Содержание легирующих элементов, если оно превышает 1 %, ставят после соответствующей буквы в целых единицах. Например, сталь марки 18ХГТ содер­жит около 0,18% С; 1 % Сг; 1 %, Мп и около 0,1 % Ti; мар­ки 12ХНЗ — 0,12% С; 1% Сг и 3% Ni

Нестандартные стали обозначают различным обра­зом. Наиболее часто встречается обозначение буквами ЭИ и ЭП и номером. Такая маркировка показывает, что сталь выплавлена на заводе «Электросталь» (буква Э), сталь исследовательская (буква И) или пробная (бук­ва П), например стали ЭИ395, ЭИ347, ЭП398 и т. д. Состав таких сталей приведен в справочниках.

Особо высококачественными выплавляют только ле­гированные стали и сплавы. Они содержат не более 0,015% серы и 0,025% фосфора. К ним предъявляют по­вышенные требования и по содержанию других приме­сей.

*Классификация по назначению*

По назначению стали подразделяют на три основные группы: конструкционные, инструментальные и с особы­ми свойствами. В основу классификации первых двух групп положено содержание углерода. Стали, содержа­щие углерода до 0,25%, используют как котельные, строительные и для деталей машин, подвергаемых цементации (см. с. 267). Низкое содержание углерода в котельных и строительных сталях обусловлено тем, что детали котлов и строительных конструкций соединяют сваркой, а углерод ухудшает свариваемость.

Для деталей машин, испытывающих ударные нагруз­ки, используют стали, содержащие 0,30—0,50% С (сталь 35, сталь 40, сталь 45, сталь 40ХН и т. д.). Эти стали подвергают термической обработке — закалке с после­дующим высокотемпературным отпуском (улучшению).

Для пружин и рессор используют стали, содержащие 0,50—0,70% С. Эти стали также применяют только пос­ле соответствующей термической обработки.

Стали, содержащие 0,7—1,5% С, используют для изготовления ударного и режущего инструмента. Угле­родистые стали маркируются У7, У8, ..., У13, где бук­ва У обозначает углеродистую сталь, а число показыва­ет содержание углерода в десятых долях процента, т. е. сталь У10 содержит 1% С. Эти стали иногда выплавля­ют высококачественными и тогда их маркируют У10А или У8А и т. п. Химический состав и механические свойства углеродистых инструментальных сталей приведены в ГОСТ 1435—74.

У инструментальных легированных сталей содержа­ние углерода также обозначают в десятых долях про­цента, например сталь марки 9ХС содержит 0,9% С; 1% Сг и 1,4% Si. Если углерода больше 1%, то цифрьь не указывают, например стали ХВГ, ХГ и т. д.

Стали и сплавы с особыми свойствами. К этой группе относятся стали, коррозионностойкие, нержавеющие и кислотоупорные; жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы; с особыми магнитными свойствами и т. д.

*Дефекты легированных сталей*

: Кроме дефектов, характерных для углеродистых ста­лей, в легированных сталях проявляются и специфиче­ские дефекты: дендритная ликвация, флокены и от­пускная хрупкость II рода .

Дендритная ликвация. Наличие легирующих элемен­тов увеличивает температурный интервал кристаллизации. Кроме того, как было отмечено, диффузионные процессы в легированных сталях протекают медленно. В результате увеличивается склонность таких сталей к дендритной ликвации и полосчатости в структуре. Ус­траняется дендритная ликвация диффузионным отжи­гом.

Флокены. Ранее неоднократно отмечалось различное влияние газов на свойства сталей, указывалось на их не­желательное присутствие, так как при этом свойства сталей ухудшаются. Так, например, возникает один из дефектов легированных сталей — флокены (трещины, ко­торые можно выявить при макротравлении). На изло­мах флокены имеют вид блестящих круглых или оваль­ных пятен, являющихся поверхностью трещин. В настоя­щее время установлено, что флокены образуются при быстром охлаждении металла от 200° С после ковки или прокатки. Их образование происходит вследствие при­сутствия в металле водорода, растворившегося в жид­ком металле при плавке. Выделяясь в деформированной стали из твердого раствора, он вызывает сильные внут­ренние напряжения, приводящие к образованию флокенов. Флокены чаще образуются в хромовых и хромоникелевых конструкционных сталях. Для предупреждения их образования после горячей пластической деформации металл охлаждают медленно в области 250—200° С или подвергают выдержке при этих температурах. Это дает возможность водороду удалиться из стали.

**8.2. Цементуемые стали**

Некоторые детали работают в условиях поверхност­ного износа, испытывая при этом и динамические на­грузки. Для изготовления таких деталей используют малоуглеродистые стали, содержащие 0,10—0,30% С, подвергая их цементации.

Для изделий небольших размеров, деталей неответ­ственного назначения применяют малоуглеродистые ста­ли марок 10, 15, 20. Для деталей более сложной формы, деталей сильно нагруженных, крупных применяют низколегированные стали с небольшим содержанием угле­рода. В качестве легирующих элементов в цементуемые стали добавляют хром, никель и т. д. Чем выше требования к свойствам, тем более сложные стали по составу применяют.
Изделия небольшого сечения и несложной формы, работающие при повышенных удельных нагрузках (втулки, валики, оси, кулачковые муфты, поршневые пальцы и т. д.), делают из хромистых сталей 15Х, 20Х, содержащих около 1%Сг. При содержании хрома до 1,5% в цементованном слое повышается концентрация углерода, образуется легированный цементит (Fe,Сг)3С, увеличивается глубина звтектоидного слоя, а после тер­мической обработки увеличивается и глубина закален­ного слоя. Дополнительное легирование этих сталей ва­надием (0,1—0,2%) — сталь 15ХФ — способствует получению более мелкого зерна, что улучшает пластич­ность и вязкость.

Для изготовления цементуемых деталей средних раз­меров, испытывающих при работе высокие удельные на­грузки, используют стали, в состав которых входит ни­кель (20ХН, 12ХНЗА). Несколько уменьшая глубину цементованного слоя, Ni в то же время увеличивает глу­бину закаленного слоя, препятствует росту зерна и обра­зованию грубой цементитной сетки. Никель положитель­но влияет и на свойства стали в сердцевине изделия. Ввиду дефицитности никеля эти стали стремятся заме­нить другими легированными сталями. К таким сталям относятся хромомарганцевые стали с небольшим количе­ством титана (0,006—0,12%): 18ХГТ, 30ХГТ. В цемен­туемые стали титан вводят только для измельчения зер­на. При большем его содержании он уменьшает глубину цементованного закаленного слоя и прокаливаемость.

Наиболее высоколегированные цементуемые стали (12Х2Н4, 18Х2Н4В и др.) используют для изготовления деталей больших сечений. Эти стали являются наиболее высокопрочными из всех цементуемых сталей.

В последние годы с целью повышения прочности для цементуемых деталей применяют стали, легированные бором (0,002—0,005%): 15ХР, 20ХГР и др. Сталь 20ХГНР в целях экономии никеля применяют вместо ста­ли 12ХНЗА. При ХТО следует учитывать, что бор, уве­личивая прокаливаемость, способствует росту зерна при нагреве. Для уменьшения чувствительности сталей к пе­регреву их дополнительно легируют Ti или Zr.

Обычно изделия, изготовленные из высоколегирован­ных цементуемых сталей, подвергают цементации на не­большую глубину. Марки цементуемых сталей приведе­ны в приложении табл. 6.

**8.3. Улучшаемые стали**

Улучшаемыми сталями называют среднеуглеродистые конструкционные стали (0,3—0,5% С), подвергае­мые закалке и последующему высокотемпературному от­пуску. После такой термической обработки стали при­обретают структуру сорбита, хорошо воспринимающую ударные нагрузки. Углеродистые улучшаемые стали (стали 35, 40, 45 и 50) обладают небольшой прокаливаемостью (до 10 мм), поэтому механические свойства с увеличением сечения изделия понижаются. Для мелких деталей после термической обработки получают σв = 60…70 кгс/мм2 и ан=4…5 кгс-м/см2. Если от деталей требуется более высокая поверхностная твердость (шпин­дели, валы, оси и т. д.), то после закалки их подвергают отпуску на твердость HRC 40—50. Для получения высо­кой поверхностной твердости используют закалку ТВЧ (шестерни, коленчатые валы, поршневые пальцы и т. д.). Для повышения механических свойств сталей при изготовлении деталей сечением более 25—30 мм в со­став сталей добавляют легирующие элементы. Легиро­ванные стали обладают большей прокаливаемостью, более мелким зерном, их критическая скорость закалки меньше, следовательно, меньше закалочные напряже­ния, выше устойчивость против отпуска. Отсюда их ос­новное преимущество перед углеродистыми конструк­ционными сталями — лучший комплекс механических свойств: выше прочность при сохранении достаточной вязкости и пластичности, ниже порог хладноломкости

и т. п. Большинство легированных конструкционных сталей относятся к перлитному классу.

При создании марок легированных сталей всегда учитывают стоимость легирующего элемента и его де­фицитность. Основным легирующим элементом в конструкцион­ных сталях является хром, содержание которого обыч­но составляет 0,8—1,1%; марганца в сталях до 1,5%; кремния 0,9—1,2%; молибдена 0,15—0,45%; никеля 1— 4,5%. Общая сумма легирующих элементов не превы­шает 3—5%.

Все перечисленные элементы, кроме никеля, увели­чивая прочность стали, понижают ее пластичность и вязкость. Никель является исключением — он оказывает особенно положительное влияние на свойства стали, увеличивая ее прочность, не понижая пластичность и вязкость. Кроме того, никель понижает порог хладно­
ломкости. Поэтому стали, содержащие никель, особенно ценны как конструкционный материал. Кроме названных элементов, в конструкционные стали для деталей машин вводят около 0,1% V, Ti, Nb,



Рис.109. Диаграмма для выбора конструкционной стали в зависимости от заданной прочности и размеров сечения а детали

1-30ХН3М; 2-30ХН3; 3- 34ХМА; 4-33ХСА; 5-30Н3; 6- 35ХА; 7-35СГ; 8-сталь 30

Zr для измельчения зерна. Введение 0,002—0,003% В уве­личивает прокаливаемость1. Состав и свойства легирован­ных конструкционных сталей приведены в приложении табл. 5.

Улучшаемые стали можно условно разделить на несколь­ко групп. Широко применяют стали, легированные хромом, особенно стали марок 40Х, 45Х. Для увеличения прокаливаемости в них иногда добавляют 5ор (сталь 40ХР). Увеличение прокаливаемости (в сечении допрокаливаемости (в сечении до

40 мм) достигается и добавлением в хромистые стали около 1% Мп: ЗОХГ, 40ХГ, 40ХГР и др. Для уменьшения склонности хромистых сталей к отпускной хрупкости II рода вводят 0,15—0,25% Мо.

Хромомарганцевые стали 20ХГС, 25ХГС, 30ХГС, называемые хромансиль, легированы хромом, кремнием и марганцем, т. е. не содержат дефицитных легирующих элементов. Эти стали обладают хорошей свариваемо­стью и прочностью, например сталь ЗОХГС после тер­мической обработки имеет σв = 165 кгс/мм2 при ан = 4 кгс-м/см2. Недостаток этих сталей — склонность к отпускной хрупкости II рода и к обезуглероживанию поверхности при нагреве.

Чем больше размер детали, сложнее ее конфигура­ция, выше напряжения, возникающие в ней в процессе работы, тем с большим количеством никеля применяют сталь для ее изготовления: 40ХНМ, 30ХН2МФ, 38ХНЗМФ и т.д.

Молибден и вольфрам вводят в состав сталей также для уменьшения склонности к отпускной хрупкости. На рис. 109 приведена диаграмма, позволяющая выбрать нужную марку стали, в зависимости от заданных проч­ности и размеров сечения.

**8.4. Высокопрочные стали**

С каждым годом растет потребность в материалах, обладающих высокой прочностью и вместе с этим не­обходимыми пластичностью и вязкостью. В обычных конструкционных сталях предел прочности ов, как пра­вило, получают не более 110—120 кгс/мм2, так как при большей прочности'сталь практически становится хруп­кой.

Стали, в которых подбором химического состава и оптимальной термической обработки получают σв = = 180—200 кгс/мм2, называют высокопрочными.

Высокопрочное состояние может быть получено не­сколькими способами. Один из таких способов — леги­рование среднеуглеродистых сталей (0,4—0,5% С) хро­мом, вольфрамом, молибденом, кремнием и ванадием. Эти элементы затрудняют разупрочняющие процессы при нагреве до 200—300° С. При этом получают мелкое зерно, что в свою очередь понижает порог хладнолом­кости, увеличивает сопротивление хрупкому разруше­нию. Например, сталь, содержащая 0,4% С; 5% Сг; 1 % Мо и 0,5% V, после закалки в масле и низкого от­пуска при 200° С имеет σв =200 кгс/мм2 при δ = 10%. Ψ =40% и ан=3 кгс-м/см2.

Стали ЗОХГСНА, 40ХГСНЗВА, 30Х2ГСНЗВМ и т.п. после термической обработки на структуру нижнего бейнита (закалка и низкий отпуск или изотермичес­кая закалка) приобретают высокую прочность — та­кая обработка сообщает сталям меньшую чувствитель­ность к надрезам. Прочность σв ≈ 160—185 кгс/мм2 при. Δ ≈ 15—12% и ан ≈ 4—2 кгс-м/см2.

Высокая прочность легированных конструкционных сталей может быть получена и за счет применения тер­момеханической обработки (ТМО). Так, стали ЗОХГСА, 40ХН, 40ХНМА, 38ХНЗМА после НТМО имеют предел прочности до 280 кгс/мм2, относительное удлинение и ударная вязкость увеличиваются в 1,5—2 раза по срав­нению с обычной термической обработкой. Объясняет ся это тем, что частичное выделение углерода из аусте-нита при деформации облегчает подвижность дислока­ций внутри кристаллов мартенсита, что и способствует повышению пластичности (охрупчивание при закалке сталей объясняется именно малой подвижностью дис­локаций в мартенсите при значительном содержании в нем углерода).

Мартенситностареющие стали К Эти стали сочетают высокие прочностные свойства с хорошей пластично­стью и вязкостью. Достигается это легированием и специальной термической обработкой. Их достоинст­ва— высокая технологическая пластичность при обра­ботке давлением в широком интервале температур; от­сутствие трещинообразования при охлаждении с лю­быми скоростями после обработки давлением; хорошая свариваемость. Недостатком этих сталей является их i склонность к ликвации.

Легирующие элементы с железом образуют твердые растворы . замещения. Поэтому при закалке мартенситное превращение про­текает по второму механизму (см. гл. 6, с. 243), т. Е. образуется реечный (массивный) мартенсит, для которого характерна высокая плотность дислокаций (до 1011—1012см). Для их закрепления требу­ется более 0,2% С, а в этих сталях его содержание <0,03%. Кроме того, никель и кобальт уменьшают степень закрепления дислокаций атомами углерода и азота, понижают сопротивление решетки мар­тенсита скольжению дислокаций, поэтому дислокации в этих сталях после закалки обладают высокой подвижностью, сталь очень пластична. После закалки σв ≈90—110 кгс/мм2, а б ≈ 14—20%, ψ≈ 70—80% и ан ≈20—30 кгс-м/см2.

Изделия из этих сталей получают пластической деформацией после закалки заготовок. Дислокационная структура, полученная после закалки, очень устойчива, сохраняется при нагреве до 500° С. Упрочнение стали происходит в процессе отпуска — старения, который проводят при 480—500° С, за счет перераспределения леги­рующих элементов. Это приводит к образованию зон концентраци­ИИ неоднородности и выделению интерметаллидных фаз NiTi, Nia(Ti, Al), FeMo2 в высокодисперсном состоянии. Наибольшее упрочнение наблюдается, когда интерметаллидные фазы находятся на стадии предвыделения, т. Е. когда они еще когерентно связаны

 о

с твердым раствором и их размер не превышает 20—50 А.

Известно, что в твердом состоянии зарождение новой фазы предпочтительно происходит на дефектах решетки, в частности на дислокациях. Дисперсные частицы, выделяясь на дислокациях, за­крепляют их. Дислокации теряют подвижность, прочность увеличи­вается. Чем мельче частицы интерметаллидов, тем больше упрочне­ние стали. Отсюда такой узкий интервал нагрева при старении.

Установлено, что чем выше содержание никеля, тем значитель­нее упрочнение стали при одинаковом содержании алюминия и титана. Наилучшее сочетание свойств

получается при введении в сталь 20 25 №. После термической обработки мартенситностареющих сталей получают σв≈240—280 кгс/мм2 при б ≈12%, ψ≈40% и ан ≈10 кгс-м/см2 (см. табл. 8). Высокая стоимость легирующих элементов, а также дефицит­ность никеля и кобальта ограничивают широкое применение таких сталей. Поэтому появились марки так называемых «экономнолегиро-ванных» мартенситностареющих сталей: Н8Х6МТЮ, 10Н4Г4Х2МЮ, Н12М2Д2ТЮ, Н8ГЗМ4 и др.

Таблица 8

Состав и механические свойства мартенситностареющих сталей



Примечание. Во всех сталях содержится: <0,03% С; 0,01% S; 0,01% Р; 0,05—0,20% А1.

Мартенситностареющие стали относятся к высоко­легированным сталям. Основным легирующим элемен­том является никель (10—26%). Кроме того, различа­ясь по составу, разные марки этих сталей содержат 7— 9% Со; 4,5—5% Мо; 5—11% Сг; 0,1—0,35 А1; ~0,15— 1,6% Ti; иногда -0,3—0,5% Nb; ≤0,2% Si, Mn; ≤0,01% S, P каждого. Титан и алюминий вводят для образования интерметаллидов.

В мартенситностареющих сталях стремятся полу­чить минимальное количество углерода (≤0,03%), так как углерод, образуя с легирующими элементами кар­биды, способствует охрупчиванию сталей. Кроме того, при этом понижается содержание легирующих, элемен­тов в твердом растворе. Термическая обработка таких сталей заключается в закалке с 800—860° С, охлаждение на воздухе и затем отпуске — старении.

Мартенситностареющие стали используют для изго­товления шасси самолетов, оболочек космических лета­тельных аппаратов, прецизионных хирургических ин ст.рументов и штампов и т. Д. Используют эти стали и для криогенной техники, так как и при отрицательных температурах они обладают высокой прочностью в со­четании с достаточной пластичностью.

**8.5. Пружинно – рессорные стали**

Основное требование к материалам, используемым для изготовления пружин, рессор,

торсионных валиков и т. Д.,--сохранение в течение длительного времени уп­ругих свойств.

Пружинные стали -

должны иметь высокий предел упругости (σуп), высокое сопротивление разрушению (Sk) и усталости при пониженной пластичности.

Термически упрочняемые пружинно-рессорные стали обычно содержат 0,5—0,7% С. Для менее

ответственных пружин и пружин мелким сечением витков применяют углеродистые стали по ГОСТ 1050—74. Для пружин более ответственного назначения и

при большем сечении витков применяют легированные пружинные стали (ГОСТ 14959—69);



Рис. 110. Схема измене-ния прочности пружин-ных сталей в зависимости от температуры отпуска

химический состав некоторых пружинных сталей дан в

приложении табл. 7.

Чаще всего пружинные стали легируют кремнием.

Задерживая распад мартенсита при отпуске и упрочняя

феррит, кремний создает высокое значение предела уп-

ругости. Кремнемарганцовистые и хромомарганцови-

стые стали (55СГ, 50ХГ и др.) имеют хорошую прокали-

ваемость и их применяют для изготовления пружин из прутков диаметром до 25 мм. Для крупных наиболее ответственных пружин применяют стали 65С2ВА, 60С2ХФА.

Режим термической обработки назначают в зависимости от состава стали и условий работы пружин. Наиболее высокая упругая прочность достигается в результате среднего отпуска на троостит. При этом отношение σуп / σв становится близким к единице (рис. 110). Для повышения выносливости пружин и рессор широко применяют дробеструйную обработку.

**8.6. Шарикоподшипниковые стали**

Детали шарикоподшипников (кольца, шарики, ро­лики) в процессе работы испытывают высокие удель­ные переменные нагрузки. Поэтому стали, используе­мые для их изготовления, должны иметь высокую проч­ность, износостойкость и высокий предел выносливости. Кроме того, к шарикоподшипниковым сталям предъяв­ляют высокие требования по содержанию неметаллических включений (сульфидных, оксидных), макро- и микрополостей, ликвации,

Таблица 9

Химический состав (%) шарикоподшипниковой стали (ГОСТ ГОСТ 801—60)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Сталь | С | Cr | Mn | Si |
| ШХ6 | 1,05 – 1,15 | 0,4 – 0,7 | 0,20 – 0,40 | 0,17 – 0,37 |
| ШХ9 | 1,05 – 1,10 | 0,9 – 1,2 | 0,20 - 0,40 | 0,17 – 0,37 |
| ШХ15 | 0,95 – 1,05 | 1,3 – 1,65 | 0,20 – 0,40 | 0,17 – 0,37 |
| ШХ15СГ | 0,95 – 1,05 | 1,3 – 1,65 | 0,90 – 1,20 | 0,40 – 0,65 |

 Примечание. Во всех сталях содержится ^0,02% S; =50,027% Р.

 размеру и расположению карбидных включений. Это обусловлено характером работы шарикоподшипников. Указанные дефекты явля­ются концентраторами напряжений, особенно если они находятся в поверхностных слоях деталей. Кроме того, при работе подшипников возможно выкрашивание не­металлических включений, что резко снижает долговеч­ность подшипника. Для изготовления шариковых и роликовых под­шипников применяют высокоуглеродистую сталь, леги­рованную хромом (табл. 9). Маркировку ШХ следует расшифровывать как ша­рикоподшипниковую хромистую. Цифра показывает среднее содержание хрома в десятых долях процента.

Шарики и ролики небольших диаметров изготавли­вают из стали ШХ9. Из стали ШХ15 изготавливают ша­рики диаметром больше 22,5 мм, ролики диаметром 15—30 мм, а также кольца всех размеров; ролики диа­метром более 30 мм и кольца с толщиной стенки более 15 мм—-из стали ШХ15СГ. Для изготовления деталей крупногабаритных подшипников, работающих при больших ударных нагрузках (например, подшипников прокатных станов), применяют цементуемую сталь марки 20Х2Н4А. При этом проводят глубокую цементацию, получая цементованный слой глубиной 5—10 мм.

**8.7. Износостойкие стали**

Износ деталей машин и аппаратов является сложным процессом. Типовыми случаями являются обычное трение скольжения и абразивный износ. В первом случае металл наклёпывается с поверхности, поэтому износостойкость существенно зависит от способности металла наклёпываться. Во втором случае, когда частицы металла вырываются с поверхности, износостойкость определяется твердостью и сопротивлением отрыву.

Как было отмечено в гл. 8, износостойкость может быть повышена химико-термической обработкой.

 Графитизированные стали. Графитизированные стали (ЭИ293, ЭИ336, ЭИ366) содержат повышенное количество углерода (до 1,75%) и кремния (до 1,6%).

Кремний вводят как графитизирующий элемент. Часть углерода в этих сталях после графитизирующего отжига (напоминающего отжиг для получения ковкого чугуна) выделяется в виде графита. После термической обработки структура стали состоит из зернистого перлита с некоторым количеством мелких округлых включений графита. При неабразивном износе графит играет роль смазки, предотвращая сухое трение и схваты-

вание. Кроме того, эти стали обладают антивибрационными свойствами.

Графитизированную сталь применяют для изготовления штампов, матриц, коленчатых валов, шаров, лопастей дробеструйных аппаратов и т. д. Высокомарганцовистые стали. Высокомарганцовистые стали, содержащие около 1% С и 12—13% Мп\*,обозначают так: сталь Г13 (1,2% С; 13% Мп; ≤0,5% Si) и сталь Г13Л (1,2% С; 12% Мп и — 1 % Si).

Буква Л означает, что сталь литая. Такая сталь имеет структуру аустенита с избыточными карбидами (Fe, Мп)3С. Выделяясь по границам, карбиды снижают вяз-



Рис. 111. Влияние степени деформации на твердость стали Г13 (1) и углеродистой стали 40 (2)

кость и прочность стали. Поэтому обычно изделия под­вергают закалке с 1050—1100° С в воде, получая струк­туру однородного марганцовистого аустенита σв=80…100 кгс/мм2; δ=40..50%; НВ 200…250). Характер­ной особенностью марганцовистого аустенита является его повышенная склонность к наклепу. При деформа­ции на 60—70% твердость стали Г13 увеличивается до НВ500 (рис. 111), что объясняется большими искажения­ми кристаллической решетки, дроблением блоков мозаики и даже образованием структуры мартенсита в поверхностных слоях.

Сталь Гадфильда широко используют для изготовления деталей, испытывающих в процессе эксплуатации удар­ные нагрузки и износ одновре­менно. Вследствие большой вязкости аустенита эта сталь плохо обрабатывается режу­щим инструментом, изделия из нее изготавливаются литьем. Из стали Г13 делают крестовины железнодорожных и трамвайных путей, зубья ковшей землечерпательных машин, траки гусеничных машин, щеки дробилок и т.д.

**8.8. Строительные и автоматные стали**

*Строительные стали*

Так как детали строительных конструкций соединя­ют сваркой, то основным требованием к строительным сталям является хорошая свариваемость. Поэтому стро­ительные стали содержат углерода до 0,25%. При бо­лее высоком содержании углерода в зонах, нагретых при сварке до температур выше критических, возможно образование структуры мартенсита. В этом случае на­блюдается объемный эффект, что способствует образо­ванию холодных трещин в зонах около сварных швов. Кроме того, углерод, расширяя интервал кристаллиза­ции металла шва, способствует образованию горячих трещин в металле шва.

В качестве строительных сталей используют глав­ным образом углеродистые стали обыкновенного качества марок СтЗ, Ст4, имеющие предел текучести 20—27 кгс/мм2.

Прочность строительных сталей повышается в ре­зультате легирования. Поскольку строительную сталь используют в больших количествах, то целесообразно вводить в ее состав дешевые легирующие элементы. Такими элементами являются марганец и кремний. Низколегированная строительная сталь содержит до 1,75% Мп и до 0,7% Si. Предел текучести увеличивает­ся до 36—38 кгс/мм2.

Состав и механические свойства некоторых таких сталей приведены в приложении, табл. 8.

Низколегированные строительные стали, кроме улучшения механических свойств, имеют еще одно пре­имущество— пониженную критическую температуру пе­рехода в хрупкое состояние. Эти стали могут работать до —40° С, а стали 10ХСНД и 15ХСНД, легированные дополнительно никелем и медью, и до —60° С.

*Автоматные стали*

Для изготовления неответственных деталей, произ­водимых в большом количестве на станках-автоматах (болты, гайки, винты, втулки и т.д.), используют так иазываемые автоматные стали (ГОСТ 1414—75). В та­ких сталях допускается повышенное содержание серы и фосфора, поэтому они обладают меньшей вязкостью, благодаря чему стружка образуется короткая и лом­кая, а поверхность обработанных деталей получает­ся чистой и ровной. При изготовлении деталей из автоматных сталей возможны большие скорости резания. Добавки свинца (~0,25%) улучшают обрабатывае­мость резанием (АС11, АС40). Автоматные стали мар­кируют буквой А (автоматная), затем следуют цифры, указывающие среднее содержание углерода в сотых до­лях процента (табл. 10).

Автоматные стали подвергают диффузионному от­жигу при температуре 1100—1150° С для устранения ликвации серы, тем самым устраняется возможность красноломкости. Для

 Таблица 10

 Химический состав (%) автоматных сталей

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка стали | C | Mn | S | P |
| А 12 | 0,08—0,16  | 0,60—0,90  | 0,08—0,20 | 0,08—0,15 |
| А 20 | 0,15—0,25  | 0,60—0,90 | 0,08—0,15 | <0,06 |
| А 30 | 0,25—0,35 | 0,70—1,00 | 0,08—0,15 | <0,06 |
| А 40Г | 0,35 – 0,45 | 1,2 – 1,55 | 0,18 – 0,30 | <0,05 |

 Примечание. Во всех сталях содержится 0,15—0,35% Si. 302

повышения прочности автоматные стали иногда нагартовывают холодной протяжкой. В последнее время автоматные стали, кроме свинца, легируют и другими элементами: марганцем, хромом, никелем (А40Г, АС20ХГНМ и др.).